

УДК 620.19

О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова,
В. А. Зорин

Ижевский государственный технический университет,
г. Ижевск

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД МНОГОКРАТНОЙ ТЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Представлены способы реализации методов многократной тени для контроля цилиндрических объектов (прутков, труб) с использованием электромагнитно-акустических преобразователей объемных и рэлеевских волн. Предложены подходы к анализу сигналов, основанные на методах спектрального, вероятностно-статистического, корреляционного анализа, обоснованы информативные параметры контроля. Приведены примеры практической реализации метода для дефектоскопии и структуроскопии прутков из рессорно-пружинной стали.

Ключевые слова: метод многократной тени, электромагнитно-акустический преобразователь, вероятностно-статистический анализ, скорость, ослабление, дефектоскопия, структуроскопия.

O. V. Muravieva, K. V. Petrov, M. Yu. Sokov, M. A. Gabbasova, I. V. Buldakova,
V. A. Zorin

MULTIPLE SHADOW ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TECHNIQUE OF THE CYLINDRICAL OBJECTS TESTING

Implementation method of multiple shadow techniques for testing of cylindrical objects (bars, tubes) using electromagnetic-acoustic transducers of bulk and Rayleigh waves are presented. Approaches to the signal analysis based on spectral, probabilistic and statistical analysis, correlation analysis methods are proposed and informative parameters of the testing are proved. Examples of the technique practical implementation for nondestructive testing of flows and structure analysis and geometry of the spring steel rods.

Keywords: multiple shadows technique, electromagnetic-acoustic transducer, probabilistic and statistical analysis, velocity, attenuation, nondestructive testing, structural testing.

Цилиндрические объекты занимают особое место в номенклатуре изделий металлургии, машиностроения, нефтяной, газовой промышленности, транспорта (прутки, трубы и разнообразные изделия из них). Особенностью

данных объектов является трудность реализации применительно к ним традиционно используемых контактных ультразвуковых (УЗ) методов, достоверность и воспроизводимость которых зависит от качества обработки поверхностей контролируемых объектов и их диаметра (особенно в случае объектов малого диаметра). Вихретоковые и магнитоиндукционные методы, несмотря на преимущество бесконтактной работы, выявляют лишь поверхностные и приповерхностные дефекты. При этом получаемая информация зависит от ряда факторов (зазор, магнитные и электрические характеристики объекта), что приводит к проблемам при идентификации дефектов.

Авторами разработана технология метода многократной тени цилиндрических объектов (прутков и труб), реализованная с помощью бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей. В статье представлены вопросы реализации метода, возможности по выявлению дефектов, подходы к обработке регистрируемых сигналов.

Методы контроля цилиндрических объектов на многократной тени реализованы с использованием проходных ЭМА-преобразователей со специальными системами подмагничивания, обеспечивающих излучение-прием поперечных (продольных) волн во всех радиальных направлениях в поперечном сечении прутка или трубы (рис. 1, *а*, *б*), а также накладных ЭМА-преобразователей рэлеевских волн, обеспечивающих возбуждение и прием волн в прямом и обратном направлениях по периметру прутка (рис. 1, *в*).

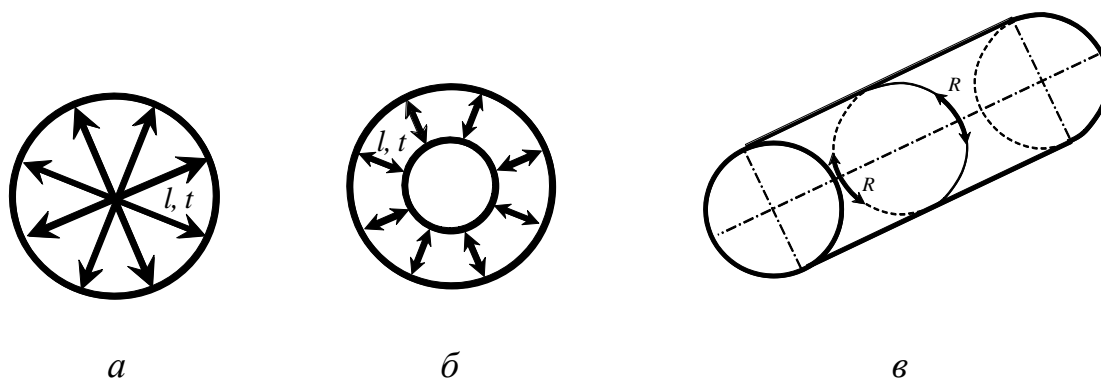


Рис. 1. Ход лучей продольных l (поперечных t) волн радиальных направлений по сечению прутка (*а*), трубы (*б*), рэлеевских волн по периметру прутка (*в*)

Пример наблюдаемой серии импульсов многократных переотражений поперечных (продольных) волн по диаметру прутка представлен на рис. 2, а. Аналогично выглядит серия импульсов релеевских волн, многократных прошедших по периметру прутка в прямом и обратном направлениях. В случае появления дефектов вид осциллограмм меняется (рис. 2, б). Наблюдаемые огибающие серии многократных отражений характеризуются увеличением ослабления для дефектных областей прутка, при этом каждое отражение по диаметру сопровождается изменением фазы колебаний на $\pi/2$.

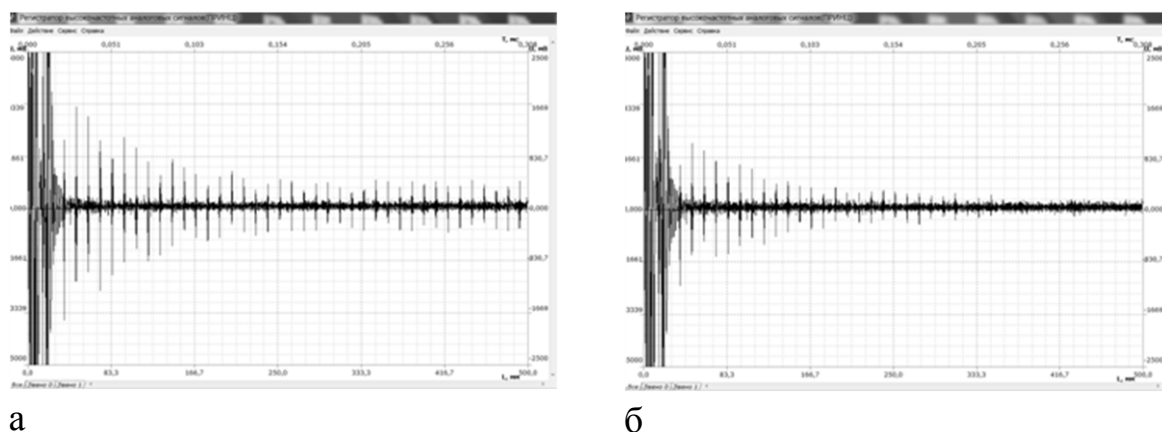


Рис. 2. Характерные осциллограммы серии многократных отражений поперечной волны по диаметру прутка в бездефектной (а) и дефектной (б) областях

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что форма огибающей сигналов может модулироваться при эллиптичности сечения прутков (рис. 3), при этом наблюдается определенная периодичность в огибающей амплитуд эхоимпульсов многократных отражений, происходит смещение эхо-импульсов по времени, появляются дополнительные импульсы, опережающие или запаздывающие относительно основных переотражений.

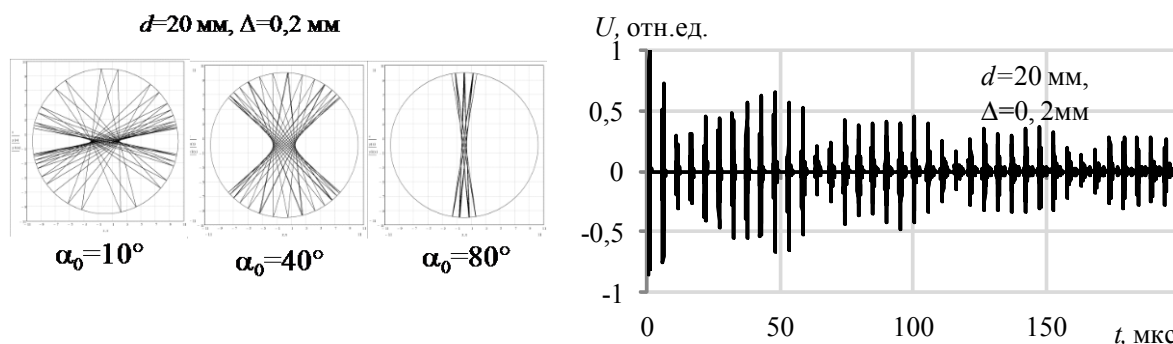


Рис. 3. Результат моделирования процесса распространения акустических волн по прутку с эллиптическим сечением (Δ – эллиптичность)

На характер огибающей импульсов многократных отражений влияет также неравномерность возбуждения волн по периметру прутка вследствие перекоса ЭМА преобразователя относительно поверхности, что требует точной ориентации объекта в ЭМА-преобразователе.

Для анализа серии импульсов многократных отражений использованы методы спектрального и вероятностно-статистического анализа и обоснованы новые информативные параметры получаемых осциллограмм. В частности, показано, что вероятностные характеристики сигнала, возведенного в квадрат, являются более чувствительными и однозначными за счет увеличения отношения сигнал-шум, а наиболее информативными с точки зрения дефектности являются вероятностные характеристики «дисперсия» и «эксцесс» (рис. 4).

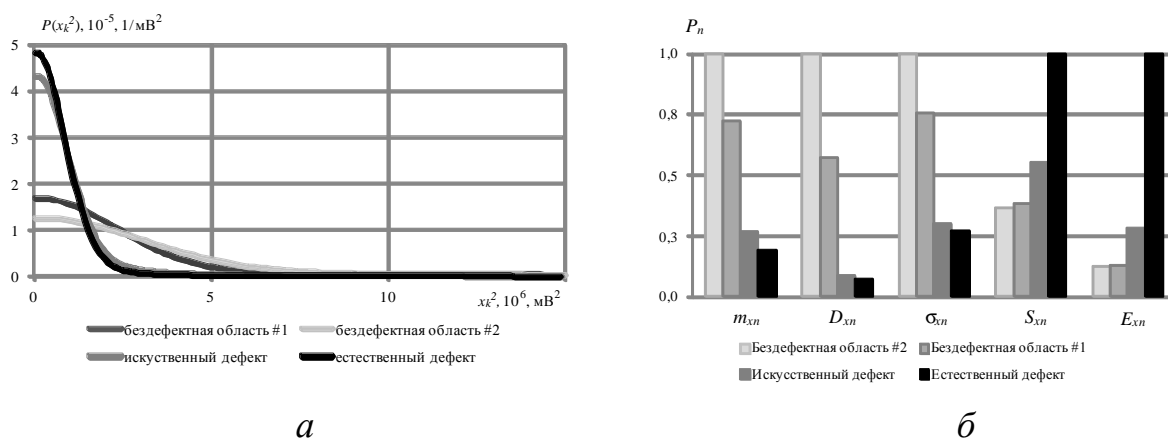


Рис. 4. Плотности распределения вероятностей сигнала (а), нормированные значения вероятностных характеристик (б) для сигнала, возведенного в квадрат для различных контролируемых областей

Исследованы возможности использования в качестве информативных следующих параметров: ослабление серии импульсов, эффективность ЭМА-преобразования, время распространения импульсов, пропорциональное скорости волны, как структурно-чувствительного фактора. Предложен метод анализа взаимной корреляционной функции (ВКФ), позволяющий обосновать выбор номера отражения, соответствующего максимуму коэффициента корреляции, для достижения максимальной точности расчета скорости волны. Анализ поведения ВКФ во всем диапазоне отраженных импульсов позволяет

оценить дефектность объекта по большому разбросу коэффициентов корреляции, и может являться дополнительным информативным параметром при дефектоскопии.

Метод использован для оценки влияния структурных изменений в пружинно-рессорной стали марки 60С2А, используемой при изготовлении железнодорожных пружин на ООО «НПЦ «Пружина», на измеряемые характеристики акустических волн. Результаты измерения скорости поперечной волны в зависимости от направления распространения по диаметру в различных сечениях прутка позволяют оценить анизотропию свойств по диаметру, в виде угловых индикатрис. Использование в качестве информативных параметров волн Релея позволяет получать информацию о приповерхностном слое объекта контроля, в частности, наблюдается корреляция скорости рэлеевских волн с глубиной обезуглероженного слоя.

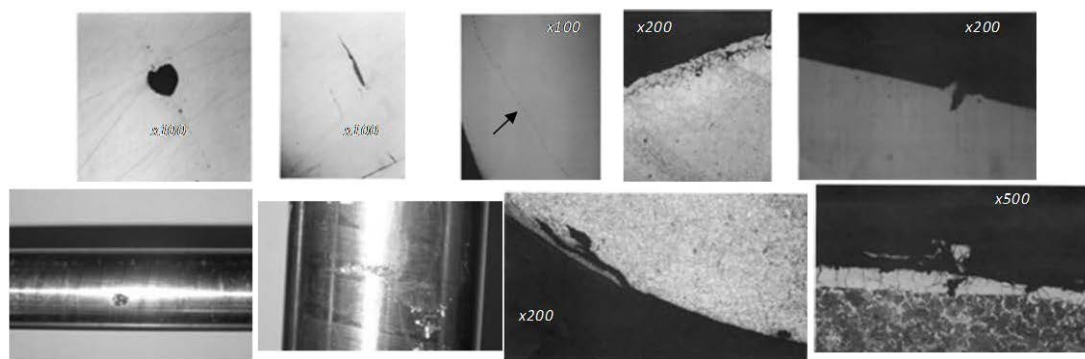


Рис. 5. Дефекты, обнаруженные в продольных и поперечных микрошлифах прутков

Испытаниям ЭМА-методом многократной тени была подвергнута партия прутков диаметрами от 10 до 30 мм с различным качеством обработки поверхности различных производителей (ОАО «Ижсталь», ЗАО «ЗМЗ», ЗАО «ОМЗ», ОАО «Северсталь-Метиз»). Фото микрошлифов для некоторых типов обнаруженных дефектов представлены на рис.5. Среди обнаруженных дефектов: неметаллические включения («оксиды точечные», «силикаты недеформирующиеся», «сульфиды», «силикаты хрупкие» «оксиды строчечные» по ГОСТ 1778), дефекты поверхности («вмятины», «слиточные плены», «закаты», «раскатанные пузыри», «раскатанные трещины», «раскатанные загрязнения», «прокатные плены», «перегрев поверхности»,

«обезуглероженный слой», «торцевые трещины» по ГОСТ 21014), недопустимые при производстве пружин.

Выводы

Разработанный ЭМА-метод многократной тени благодаря возможности получения серии многократных отражений, насчитывающих десятки ультразвуковых импульсов, обеспечивает надежный контроль качества цилиндрических объектов, включающий дефектоскопию, оценку структуры, упругих модулей и анизотропии металла, возможность выявления отклонений по диаметру и эллиптичности сечения.

Разработанные технологии обладают следующими преимуществами: высокая реальная чувствительность к внутренним и поверхностным дефектам; реализация методов без иммерсионной жидкости и дополнительной подготовки поверхности с обеспечением достаточно высокой производительности контроля; высокая достоверность и воспроизводимость результатов контроля за счет отстройки от качества акустического контакта; отсутствие мертвой зоны; возможность использования методов для контроля прутков из различных металлов и сплавов.

Использование дополнительных информативных параметров (скорость, затухание, эффективность ЭМА-преобразования) и новых методов обработки сигналов (вероятностно-статический, спектральный, корреляционный) позволяет повысить информативность разработанных методов.

Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.